ChinaXiv合作期刊

第39卷 第2期
2022年3月
干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH
Vol. 39 No. 2
Mar. 2022

保护性耕作对黄土高原半干旱区农田土壤N_2O排放的影响

杜梦寅[1]， 袁建钰[1]， 李 广[1]， 闫丽娟[2]， 刘兴宇[1]， 祁小平[1]， 庞 晔[1]
（1. 甘肃农业大学林学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃农业大学农学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：一氧化二氮（N_2O）是大气中重要的温室气体之一，在全球气候变暖问题中备受关注，而农田土壤是其主要排放源。在影响农田N_2O排放的诸多因子中，耕作措施作为关键因素，其对旱地农田土壤N_2O的排放规律尚不明确。为此，本试验以传统耕作（T）为对照、布设免耕（NT）、传统耕作+秸秆覆盖（TS）、免耕+秸秆覆盖（NTS）3种保护性耕作，采用静态箱-气相色谱法对春小麦地土壤N_2O排放通量进行测定，并对影响N_2O排放的相关因子及春小麦产量进行同期测定。结果表明：（1）春小麦地不同耕作措施下土壤N_2O累计排放量大小顺序为：T>NT>TS>NTS，其中T处理显著高于其他处理，分别较NT、TS、NTS处理增加了15.87%、28.08%和39.58%，另外相比于T处理，保护性耕作有助于表层土壤NH_4^+-N含量及春小麦产量的增加，并减少NO_3^--N含量的积累。（2）相关关系表明，土壤温度、土壤含水量及NH_4^+-N含量是影响土壤N_2O排放的关键因素。其中，土壤含水量、NH_4^+-N含量与春小麦地土壤N_2O排放量均呈极显著负相关关系，土壤温度与N_2O排放量呈极显著正相关关系。因此，以经济效益和环境效益为基础，综合考虑N_2O排放量和作物产量，黄土高原半干旱区以NTS处理为最优耕作措施。

关键词：温室气体；保护性耕作；耕作措施；春小麦；相关关系；黄土高原

目前，全球气候变暖等问题日趋严峻，主要原因是温室气体浓度的持续增加。而N_2O作为影响气候变暖的三大温室气体之一，其增温潜势大，且滞留在大气中的时间长，浓度以年均0.25%的速率持续上升，严重影响着全球气候变化[1]。农业活动是影响土壤N_2O排放的主要因素，农田作为其重要的排放源，每年所排放的N_2O达到全球总量的60%以上[2]。而旱作农田土地分布广泛，不仅在我国农业生产生活中占据极为重要的地位，更是大气中N_2O的主要来源[3]。因此，研究旱地农田土壤N_2O的排放特征与如何减缓温室气体的排放显得极为重要。

黄土高原地处中国中部偏北部，干旱和水土流失是其独有的地域特征，春小麦作为黄土高原地区主要农作物之一，因其抗旱性强、生育期短、产量可观，已作为优良农作物成为黄土高原地区种植首选[3]。保护性耕作作为全球农业生产中的一项重要推荐措施，可显著减少黄土高原半干旱地区土壤水分蒸发，减缓地表径流量，涵养水土，改善土地质量，并对土壤温度、水分、结构及酶活性等理化性质造成影响，进而改变农田土壤N_2O的排放[4-5]。因此研究不同耕作措施下春小麦地土壤N_2O排放量、产量及二者间的平衡关系，对于黄土高原农田增产减排具有重要意义。张玉铭等[6]研究指出，耕作措施是影响农田土壤N_2O排放的重要因素，与免耕相比，传统耕作更有利于土壤N_2O的排放，这主要是因为土壤翻动促进了郁闭于土壤内的N_2O向大气中的释放。胡春胜等[7]发现，秸秆还田可改善氮素的迁移过程与转化规律，有效降低氮素以气体形式的流失。Ball等[8]则认为，免耕措施下的土壤密度和土壤含水量相对较高，土壤中气体的扩散能力受到阻碍，并增强了土壤中的厌氧环境，使表层土壤中生

收稿日期：2021-10-10； **修订日期：**2021-10-31
基金项目：国家自然科学基金（32160416）；甘肃省重点研究发展计划（20YF8NA135）；甘肃省财政专项（GSCZZ 20160909）；甘肃省重点人才项目（LRYCZ-2020-1）；甘肃省教育厅产业支撑计划项目（2021CYZC-15）
作者简介：杜梦寅（1998-），男，硕士研究生，主要从事土壤氮循环. E-mail: 920446333@qq.com
通讯作者：李广. E-mail: lig@gsau.edu.cn

chinaXiv:202203.00087v1

ChinaXiv合作期刊

物的反硝化作用进一步提高，从而促进土壤中N_2O的排放。综上所述，不同耕作措施对土壤N_2O排放的影响因素在不同温度、水分、以及土壤条件下均有不同结果，大多研究已经证明保护性耕作对土壤养分及农作物产量的提升具有重大作用，但对影响旱地农田土壤N_2O排放的关键因素及其响应机制尚不清楚，需进一步研究。

为了更好揭示保护性耕作下土壤理化性质和环境因子对土壤N_2O排放的影响，本试验以黄土高原4种耕作措施下的春小麦地为研究对象，分析不同耕作措施下土壤N_2O排放特征和影响N_2O排放的环境因子，探究二者之间的相关关系，揭示不同耕作措施下农田土壤N_2O排放的影响机制，从而提出增产减排的最优耕作方式，进而为区域粮食生产安全及生态环境建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安定区安家坡村甘肃农业大学旱农综合试验站(35°64′N，104°64′E)，属温带半干旱气候，平均海拔2000 m，年均气温6.4 ℃，年均≥0 ℃年积温2933.5 ℃·d，年均≥10 ℃年积温2239.1 ℃·d，年平均降水量394.1 mm，主要集中在7—9月，年潜在蒸发量约为降水量的4倍，气候干燥，年平均气温6.4 ℃，无霜期平均140 d，属于典型的半干旱雨养农业区，试验地平坦无起伏，土壤多为当地典型的黄绵土，土层深厚，土质绵软且质地均匀，蓄水性能良好，土壤容重为1.19 $g\cdot cm^{-3}$，土壤有机质12.01 $g\cdot kg^{-1}$，全氮0.76 $g\cdot kg^{-1}$，全磷1.77 $g\cdot kg^{-1}$。

1.2 试验设计

大田试验开始于2016年，已持续定位5 a，本试验以2021年数据为主。选用当地春小麦“甘春35号”作为供试品种，在2021年3月25日播种，8月5日收获。以传统耕作(T)为对照，布设3种耕作措施：免耕(NT)、免耕+秸秆覆盖(NTS)、传统耕作+秸秆覆盖(TS)(表1)。各处理设置3次重复，共12块小区，小区面积统一为24 m^2，播种量为187.5 $kg\cdot hm^{-2}$，行距25 cm。配施150 $kg\cdot hm^{-2}$过磷酸二铵和62.5 $kg\cdot hm^{-2}$尿素作为试验地基肥，于播种时一次性施入，并采用随机区组排列。

1.3 土壤气体的采集与分析

土壤N_2O通过静态箱-气相色谱法测定。采样时间固定在9:00—11:00(气温接近1 d的均值)，生育期每20 d测定1次。具体采用尺寸为50 cm×50 cm×50 cm无底正方体暗箱，箱壁用1 mm厚304K薄不锈钢板制成，箱外用泡沫包裹以确保箱内温度变化不大，顶箱上端装有2个空气搅拌风扇，箱侧面装有风扇的电源插头、取气样的接口和测温接口，底座尺寸为50 cm×50 cm×20 cm，上部有密封水槽。当测定时，将不锈钢底座固定于土壤中。采样时底座水槽内加水密封，进行气体样品采集。扣箱后立即用100 mL注射器采集第1次样品，每隔8 min取100 mL气体保存，罩箱40 min，共取样5次。采样后立即将样品带回实验室采用气相色谱方法于一周内对土壤N_2O完成分析，确定不同处理下N_2O排放特征。

测定期内N_2O排放通量F可通过下式进行运算：

$$F=\frac{C_2\times V\times M_0\times 273/T_2-C_1\times V\times M_0\times 273/T_1}{A\times(t_2-t_1)\times 22.4} \quad (1)$$

式中：F为土壤N_2O排放通量($mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$)；$A$为采样箱底面积($m^2$)；$V$为采样箱体积($m^3$)；$M_0$为气体分子量；$C_1$、$C_2$分别为采样箱关闭时和开启前箱内气体的体积浓度(mol·mol)；T_1、T_2分别为采样箱关闭和开启前箱内温度(K)；t_1、t_2为测定开始和结束的时间。

农田土壤N_2O累计排放量M可通过下式进行运算：

$$M=\sum\left(F_{N+1}+F_N\right)\times 0.5\times(t_{N+1}+t_N)\times 24\times 10^{-2} \quad (2)$$

表1 春小麦地不同处理描述

Tab. 1 Description of different treatments of spring wheat

处理	代码	耕作方法
传统耕作	T	3月25日播种作物，收获后至冬至前三耕两耱
传统耕作+秸秆覆盖	TS	耕作方式同T，收获后脱粒并将作物秸秆均匀归还原小区
免耕	NT	全年不耕作，不进行秸秆覆盖
免耕+秸秆覆盖	NTS	耕作方式同NT，秸秆覆盖方式同TS

chinaXiv:202203.00087v1

ChinaXiv合作期刊

式中：M为整个生育期内土壤N_2O排放量（$kg \cdot hm^{-2}$）；F为土壤N_2O排放通量（$mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$）；$N$为采样次数；$t$为距离初次采样的时间。

1.4 土壤样品的采集与处理

气体采集的同时，每块小区在靠近底座的周边位置随机选取3个点，采用直径5 cm土钻取0~10 cm土壤样品，剔除杂质，装入自封袋放置在装有冰袋的样品箱中低温运输，带回实验室后用于各项指标的测定[9]，其中土壤含水量采用铝盒烘干法（105±2 ℃）测定，将空铝盒称重后放入土壤样品并置于105~110 ℃烘箱中烘干至恒重，测得烘干土重量，再根据该值计算水分重量的百分比从而得到土壤含水量数据。土壤NO_3^--N和NH_4^+-N采用氯化钾浸提比色法进行测定。将土样过2 mm筛后称取10 g，加入氯化钾溶液100 mL，放于摇床震荡1 h后静置30 min等待澄清，吸取20 mL上清液，加0.5 g MgO于凯氏定氮仪中蒸馏3 min，在定氮仪冷凝管出口加5 mL硼酸溶液用于对氨的吸收，用H_2SO_4溶液进行滴定，测定土壤NH_4^+-N含量；蒸馏后溶液加1 mL氨基磺酸，再加0.5 g代氏合金粉，放入凯氏定氮仪蒸馏3 min，在冷凝管出口加5 mL硼酸溶液吸收，用H_2SO_4溶液滴定，测定土壤NO_3^--N含量。土壤温度采用EM50进行长期监测[10]。小麦成熟后，每试验区随机选取9行小麦计算产量、株高、穗粒数及千粒重。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施下春小麦地土壤N_2O排放通量的动态变化

春小麦整个生育期内各处理下土壤N_2O排放通量的变化规律基本一致（图1），播种后排放量较低且平稳上升，在4月5日左右出现第1个排放峰，这可能与施入基肥有关，而后平稳下降，第2次出现N_2O排放峰在5月15日左右，具体为0.1943 $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$，其中T处理最大，其次是NT、TS、NTS，这是因为此阶段水热条件适中，氮素含量相对较高，硝化反硝化反应底物充足。随后至拔节期，4种耕作措施下N_2O排放通量均呈下降趋势，并于6月5日达到最低值，为NTS处理，具体为0.0160 $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$，这可能与测定前的降雨有关。此后至成熟期，各处理间差异缩小，并趋于稳定，随温度的逐渐升高N_2O排放通量呈缓慢上升趋势直至收获。

2.2 不同耕作措施下土壤N_2O累计排放量及其产量

不同耕作措施下春小麦地土壤N_2O累计排放量大小顺序为：T＞NT＞TS＞NTS（图2），其中T处理下N_2O累计排放量显著高于其他处理，分别较NT、TS、NTS高出0.2876、0.4102、0.5955，且各处理间差异显著（$P<0.05$）。不同耕作措施下春小麦产量及其构成要素如表2所示。其中，NTS处理下的春小

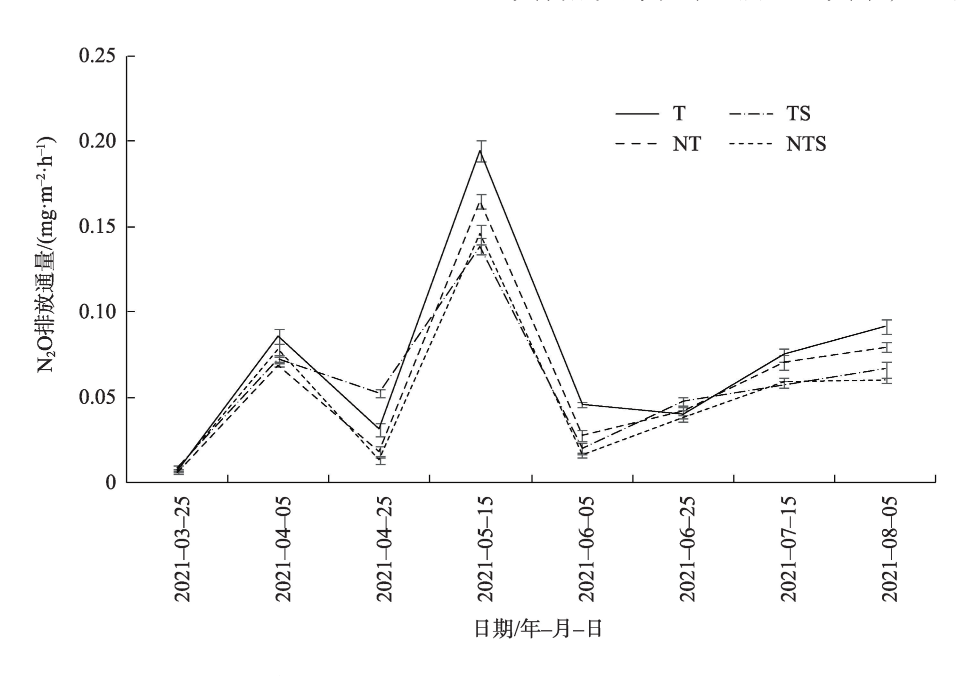


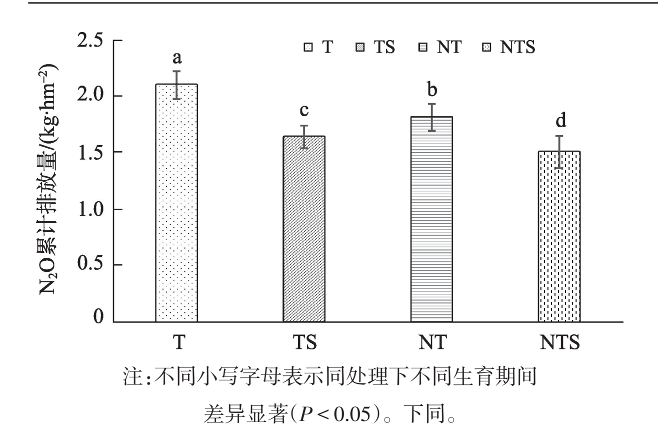
图1 不同耕作措施下春小麦地土壤N_2O排放通量的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes of soil N_2O emission flux in spring wheat field under different tillage measures

chinaXiv:202203.00087v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202203.00087v1



注:不同小写字母表示同处理下不同生育期间差异显著($P<0.05$)。下同。

图2 不同耕作措施下春小麦地土壤N_2O累计排放量

Fig. 2 Cumulative N_2O emission from spring wheat soil under different tillage measures

表2 不同耕作措施下春小麦产量及其构成要素

Tab. 2 Yield and its components of spring wheat under different tillage measures

处理	株高/cm	穗粒数	千粒重/g	产量/(kg·hm^{-2})
T	96.87c	22b	37.91a	1282.2a
TS	99.93bc	34a	41.93ab	1436.15b
NT	101.33ab	30ab	43.50ab	1450.47b
NTS	104a	32ab	47.44b	1607.47c

注:同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

麦产量,株高以及千粒重均达到最大值,且产量及千粒重与T处理差异显著,NTS处理下的春小麦穗粒数与其他处理间差异不显著,而株高与T和TS处理间存在显著差异,但和NT处理差异不显著($P<0.05$)。由此可见,结合春小麦产量及N_2O排放量,NTS处理可作为黄土高原半干旱区最适宜的耕作方式。

2.3 不同耕作措施下土壤NO_3^--N、NH_4^+-N的动态变化

不同耕作措施下春小麦全生育期0~10 cm土壤NO_3^--N和NH_4^+-N含量变化特征如图3所示,NO_3^--N含量在春小麦生育前期含量较高,随生育期推进整体呈平稳下降的趋势,波动范围是0.0203~0.0415 g·kg^{-1}。整体来看,T处理下的NO_3^--N含量最高,而NTS处理下土壤NO_3^--N含量则处于较低水平,T、TS、NT和NTS处理下NO_3^--N平均含量分别为0.0322 g·kg^{-1}、0.0319 g·kg^{-1}、0.0321 g·kg^{-1}和0.0309 g·kg^{-1}。可以明显看出,整个生育期不同处理间土壤NH_4^+-N含量都是以NTS处理最高,最大值为0.0184 g·kg^{-1},不同耕作措施处理下土壤NH_4^+-N含量随生育期推进呈现先减后增的趋势,且变化平缓,波动范围为0.0122~0.0184 g·kg^{-1}。T、TS、NT和NTS处理下NH_4^+-N平均含量分别为0.0137 g·kg^{-1}、0.0151 g·kg^{-1}、0.0143 g·kg^{-1}和0.0163 g·kg^{-1},相关分析表明(表3),N_2O排放量与土壤NO_3^--N含量呈正相关关系而与土壤NH_4^+-N含量呈现极显著负相关关系($P<0.01$)。

2.4 环境因子对不同耕作措施下土壤N_2O排放的影响

土壤温度对农田土壤N_2O排放具有一定影响,相关分析显示(表3),5 cm耕层下土壤温度与N_2O排放量相关关系最为显著,为极显著正相关关系($P<0.01$)。具体变化特征如图4所示,各处理下土壤温度变化相对稳定,各处理间差异不大,整个生育期内温度波动范围为6.0~28.6 ℃。由于硝化反硝化反应在5~35 ℃的范围内都可以进行,因此土壤温度通过影响硝化反硝化细菌活性来影响硝化反硝化反应产生N_2O,进而成为影响土壤N_2O排放的重要环境因子。土壤含水量与N_2O排放量的相关性如表3所示,结果表明:春小麦地N_2O排放量与0~10 cm层土壤含水量相关性较高,表现出极显著负相关关系($P<0.01$)。不同耕作处理间土壤含水量变化差异不大,波动范围在7.26%~11.56%。具体变化特征如图5所示,其中NTS处理下0~10 cm土层土壤含水量在整个生育期均高于其他处理。

3 讨 论

3.1 不同耕作措施对土壤N_2O排放通量及春小麦产量的影响

农田土壤是N_2O的重要排放源,其产生和排放受耕作、施肥、灌溉等多种农作措施的影响。前人研究发现,持续保护性耕作在降低土壤N_2O排放方面有巨大潜力[11]。本研究结果表明,旱作春小麦地为N_2O排放源,春小麦地土壤N_2O首次出现排放峰在4月5日左右,这是因为播种时施入基肥,基肥开始发挥肥效使得部分氮素进入土壤,土壤通过呼吸作用排放部分N_2O,但由于此时温度较低,土壤微生物活性较弱,N_2O排放量相对较少,因此出现小型排放峰。随着春小麦生长至5月15日左右,N_2O排放出现第2个峰值,这是因为土壤温度不断升高,土壤冻融期结束,肥效得以完全发挥使得土壤表层氮素

ChinaXiv合作期刊

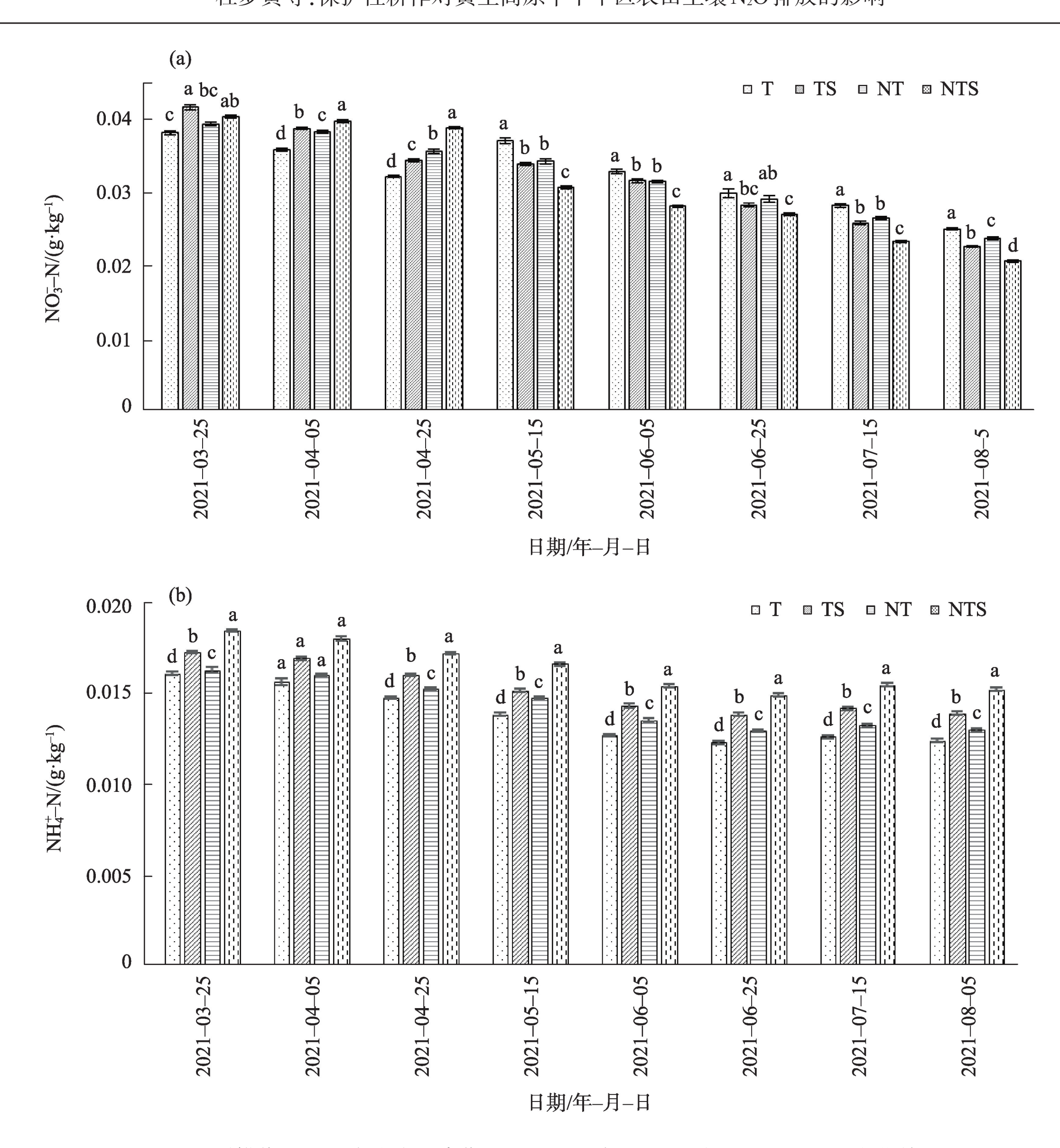


图3　不同耕作措施下春小麦生育期0~10 cm土壤NO_3^--N与NH_4^+-N含量变化特征

Fig. 3　Variation characteristics of NO_3^--N and NH_4^+-N content in 0–10 cm soil during the whole growth period of spring wheat under different tillage measures

表3　春小麦地土壤N_2O排放通量与其影响因子间的相关关系

Tab. 3　Correlation between soil N_2O emission flux and its influencing factors in spring wheat field

指标	土壤温度	土壤含水量	NO_3^--N	NH_4^+-N
N_2O通量	0.757**	–0.851**	0.134	–0.654**

注:**表示该因子在$P<0.01$水平下达到显著水平。

含量较高,为硝化反硝化作用提供充足底物;另一方面此阶段水热条件良好,土壤微生物活性较强,硝化反硝化作用随之增强,因而出现排放峰。随生育期推近,土壤肥力下降,并且由于测定前的降雨导致麦地淹水,反硝化作用以生产N_2为主,水层阻碍N_2O向大气扩散并溶解少量N_2O,因此N_2O排放通量呈急剧下降趋势。从春小麦整个生育期来看,T处理较NT、TS、NTS处理下的N_2O累计排放量分别增加了15.87%、28.08%和39.58%。说明保护性耕作对春小麦地土壤N_2O的排放起到了抑制作用,可能是因为传统耕作下农田土壤具有较好的透水透气性,有利于土壤从厌氧环境向好氧环境的转变,从而促进硝化作用产生N_2O,并加强了气体的扩散与养分在土壤中的迁移,使土壤SOC、NH_4^+-N和NO_3^--N从深层土壤重新上移至向表层土壤,使表层死地被物进入土壤下层并加速其分解,进而促进了土壤中N_2O的排放[12]。此外,在秸秆覆盖条件下,土

chinaXiv:202203.00087v1

ChinaXiv合作期刊

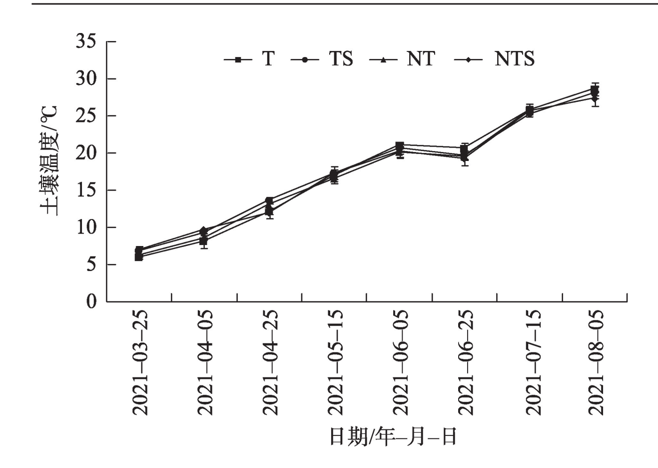


图4 不同耕作措施下5 cm土层土壤温度变化

Fig. 4 Changes of soil temperature in 5 cm soil layer under different tillage measures

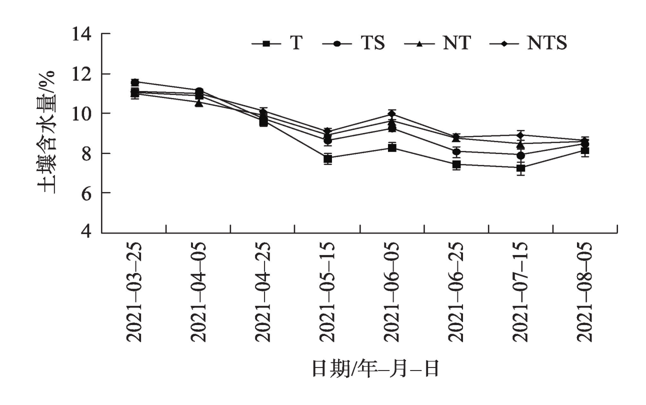


图5 不同耕作措施下0~10 cm土层土壤含水量变化

Fig. 5 Changes of soil water content in 0–10 cm soil layer under different tillage measures

壤C/N增加而有利于微生物对N源的争夺,使土壤N利用充分,从而抑制硝化、反硝化反应生成中间产物N_2O的排出[13]。汪婧等[14]研究发现,半干旱地区进行保护性耕作可显著改善土壤团粒结构且有利于土壤中有机质的积累,提高土壤C/N,减缓硝化反硝化作用,其中尤以秸秆还田效果更为明显,这与本研究结果一致。江波等[15]研究圩区冬小麦-水稻轮作系统中发现,TS处理下的土壤N_2O累积排放量比NTS处理高出1.71倍,这可能是由于NTS处理下所施用的化肥暴露于土壤表面,在短时间内大量挥发所致,导致土壤微生物进行硝化反硝化作用所需底物减少。而冯珺珩等[16]研究发现,免耕与传统耕作相比,免耕处理下的N_2O排放提高了12.5%~38.6%。与本研究结果不一致的原因可能是因为土壤质地的不同,土壤质地调控免耕土壤N_2O排放,土壤渗透性差会促进免耕土壤N_2O产生[17]。本试验地为通气性较好的黄绵土,因此导致免耕处理下N_2O排放低于传统耕作。

本试验结果表明,与传统耕作相比,保护性耕作处理下的春小麦产量得到了显著提高,且NTS处理下产量达到最高,有学者认为是免耕提高了土壤有机质和养分含量,改善了土壤物理性状,提高了作物氮素吸收[18],秸秆覆盖可促进土壤腐殖质的形成,增加土壤团聚体,并且秸秆自身亦可释放营养物质供作物吸收以此来提高产量[19],Borghei等[20]认为,NTS处理可以显著减少播期地表水蒸发,增加土壤含水量,对干物质的持续积累具有重要影响。许菁等[21]研究发现,NT处理相较于T处理可以显著提高冬小麦花后干物质积累及其对籽粒产量的贡献,进而提高产量。上述结论均与本研究结果一致。由此可见,保护性耕作不仅对作物产量有提升作用,还可以有效减少N_2O的排放,充分起到减少氮素流失,提高作物产量的作用。

3.2 土壤环境因子及NO_3^-–N、NH_4^+–N对N_2O排放通量的影响

旱地农田土壤N_2O主要是土壤微生物参与硝化和反硝化作用产生的[22],同时土壤温湿度、土壤结构、土壤pH等环境因子对土壤N_2O排放也具有一定影响,其中,土壤温度及含水量对旱作农田N_2O排放的影响极为关键[23]。本研究发现,土壤温度与不同处理下全生育期春小麦地土壤N_2O排放量均呈现极显著正相关关系($P<0.01$),这是因为一方面温度对土壤微生物活性的影响极为明显,温度每升高10 ℃,反硝化细菌的活性则会提高1.5~3.0倍[24];另一方面土壤温度升高,土壤中微生物的呼吸作用得到促进,导致土壤微域氧气缺失,为反硝化生物创造了厌氧条件,反硝化作用产生的N_2O随之增加。土壤水分含量主要通过改变土壤透气性、土壤氧化还原状况及微生物活性进而影响N_2O排放[25],土壤水分作为影响土壤微生物细胞代谢和养分运输的重要环境因子,对硝化和反硝化作用过程也起到了决定性影响[26-27]。本试验结果显示,土壤含水量与土壤N_2O排放量呈极显著负相关关系($P<0.01$),这可能是因为随着土壤水分含量的增加,硝化过程受到抑制,土壤处于厌氧和强还原状态,N_2O还原酶可将反硝化作用产生的N_2O还原为N_2,N_2O在土壤中的扩散也受到严重阻碍,因此排放量减少[28]。

N_2O是厌氧条件下反硝化细菌还原NO_3^-或NO_2^-的产物之一,也是微生物通过硝化作用将NH_3或

chinaXiv:202203.00087v1

ChinaXiv合作期刊

NH_4^+氧化为NO_x^-的过程中的中间产物。试验中向土壤中施加的无机氮会为土壤提供NO_3^-和NH_4^+,以此对土壤N_2O的排放产生影响[29]。本试验结果显示,土壤N_2O排放量与土壤NH_4^+-N呈现极显著负相关关系,这是因为旱地土壤上表层土壤N_2O的主要来源为土壤的硝化过程[30],当N_2O大量排放时,土壤中的NH_4^+-N水解,提供微生物硝化作用所需底物NO_3^-,这一过程之后造成土壤中NO_3^--N的累积,NH_4^+-N的减少。许宏伟等[31]研究指出,N_2O排放量与土壤NH_4^+-N含量具有显著的相关性,而与NO_3^--N含量无明显的相关关系。这可能是由于该地区土壤为碱性,N_2O还原酶Nos的活性较强而硝酸还原酶Nar以及亚硝酸还原酶Nir活性较弱,不利于反硝化作用生成N_2O[32]。可见,因试验地区的环境因素、土壤pH、耕作制度及无机氮的配施,土壤N_2O的排放特征也有差异。

4 结 论

通过对黄土高原半干旱区不同耕作措施下农田土壤及影响N_2O排放的关键因素进行分析,得出以下结论:

(1)不同耕作措施下N_2O排放通量随生育期的推进变化大概一致,均在分蘖期达到排放峰,各处理下N_2O累积排放量大小顺序为:T>NT>TS>NTS,以经济效益和环境效益为基础,黄土高原半干旱区应以NTS(免耕+秸秆覆盖)处理为最优耕作措施。

(2)N_2O排放量与环境因子及土壤无机氮的相关性分析表明,土壤温度,土壤含水量及NH_4^+-N含量对N_2O排放通量的影响较大,并达到极显著相关水平,因此应着重考虑对上述因子的调控以达到N_2O减排的目的。

参考文献(References):

[1] IPCC. Global Change 1995: The Science of Climate Chang. Contribution of Working Group I to the Second Assessment R eport of the Intergovernmental Pan0el on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

[2] 董星丰, 陈强, 李浩, 等. 全球气候变化对我国高寒地区冻土温室气体通量的影响[J]. 土壤与作物, 2019, 8(2): 178−185. [Dong Xingfeng, Chen Qiang, Li Hao, et al. Effects of climate change on permafrost greenhouse gas flux in alpine region of China[J]. Soils and Crops, 2019, 8(2): 178−185.]

[3] 李玥, 牛俊义, 李广, 等. 黄土丘陵区旱地春小麦气候适宜度及其变化特征——以定西市李家堡乡麻子川村为例[J]. 干旱区研究, 2014, 31(4): 627−635. [Li Yue, Niu Junyi, Li Guang, et al. Climate suitability degree and its change for spring wheat in dryland in the hilly-gully region of the Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(4): 627−635.]

[4] 张志勇, 于旭昊, 熊淑萍, 等. 耕作方式与氮肥减施对黄褐土麦田土壤酶活性及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(2): 418−428. [Zhang Zhiyong, Yu Xuhao, Xiong Shuping, et al. Effects of tillage methods and nitrogen fertilizer reduction on soil enzyme activities and greenhouse gas emissions of wheat yellow cinnamon soil[J]. Journal of Agro Environment Science, 2020, 39(2): 418−428.]

[5] 王嘉男, 李玲玲, 谢军红, 等. 半干旱区保护性耕作对旱作春小麦光合特性和产量形成的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(12): 1493−1500. [Wang Jianan, Li Lingling, Xie Junhong, et al. Effects of conservation tillage on photosynthetic characteristics and yield formation of dryland spring wheat in semi-arid area[J]. Journal of Wheat Crops, 2020, 40(12): 1493−1500.]

[6] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO_2, CH_4, N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966−975. [Zhang Yuming, Hu Chunsheng, Zhang Jiabao, et al. Research progress on source sink intensity and greenhouse effect of major greenhouse gases (CO_2, CH_4, N_2O) in farmland soil[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2011, 19(4): 966−975.]

[7] 胡春胜, 董文旭, 张玉铭, 等. 华北山前平原农田生态系统氮通量与调控[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 997−1003. [Hu Chunsheng, Dong Wenxu, Zhang Yuming, et al. Nitrogen flux and its manipulation in the cropland ecosystem of the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2011, 19(5): 997−1003.]

[8] Ball B, Horgan G, Crichton I, et al. Dynamics of upward and downward N_2O and CO_2 fluxes in ploughed or no tilled soils in relation to water filled pore space, compaction and crop presence[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 101(1/2): 20−30.

[9] 张娟, 李广, 袁建钰, 等. 水氮调控对旱作春小麦土壤、叶片养分含量的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1750−1759. [Zhang Juan, Li Guang, Yuan Jianyu, et al. Effect of water nitrogen regulation on soil and leaf stoichiometric characteristics of spring wheat in dry farming [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1750−1759.]

[10] 刘帅楠, 李广, 宋良翠, 等. 早播及耕作措施对黄土高原半干旱区春小麦土壤氮磷元素的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1367−1375. [Liu Shuainan, Li Guang, Song Liangcui, et al. Effects of early planting and farming measures on nitrogen and phosphorus in spring wheat soils in semi-arid areas of the Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(05): 1367−1375.]

[11] Azam F, Muller C, Weiske A, et al. Nitrification and denitrification assources of atmospheric nitrous oxide-role of oxidizable car-

chinaXiv:202203.00087v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:202203.00087v1

bon andapplied nitrogen[J]. Biology & Fertility of Soils, 2002, 35 (1): 54−61.

[12] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 应用DNDC模型分析施肥和翻耕方式变化对旱田土壤N_2O释放的潜在影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 918−922. [Xu Wenbin, Liu Weiping, Liu Guangshen. Potential effect of fertilising and tilling on N_2O emission from upland soils analyzed by DNDC model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(6): 918−922.]

[13] 贺京, 李涵茂, 方丽, 等. 秸秆还田对中国农田土壤温室气体排放的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(20): 246−250. [He Jing, Li Hanmao, Fang Li, et al. Influence of straw application on agricultural greenhouse gas emissions in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(20): 246−250.]

[14] 汪婧, 蔡立群, 张仁陟, 等. 耕作措施对温带半干旱地区土壤温室气体(CO_2, CH_4, N_2O)通量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6): 1295−1300. [Wang Jing, Cai Liqun, Zhang Renzhi, et al. Effect of tillage pattern on soil greenhouse gases (CO_2, CH_4, N_2O) fluxes in semi-arid temperate regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2001, 19(6): 1295−1300.]

[15] 江波, 杨书运, 马友华, 等. 耕作方式对圩区冬小麦温室气体排放通量的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2014, 41(2): 241−247. [Jiang Bo, Yang Shuyun, Ma Youhua, et al. Effects on emission of greenhouse gas by different tillage treatments to winter wheat in polder areas[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2014, 41 (2): 241−247.]

[16] 冯珺珩, 黄金凤, 刘天奇, 等. 耕作与秸秆还田方式对稻田N_2O排放、水稻氮吸收及产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(8): 1250−1259. [Feng Junheng, Huang Jinfeng, Liu Tianqi, et al. Effects of tillage and straw returning methods on N_2O emission from paddy fields, nitrogen uptake of rice plant and grain yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(8): 1250−1259.]

[17] Rochette P. No-till only increases N_2O emissions in poorly-aerated soils[J]. Soil Tillage Research, 2008, 101(2): 97−100.

[18] Malhi S S, Lemke R, Wang Z H, et al. Tillage, nitrogen and crop residue effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality, and greenhouse gas emissions[J]. Soil Tillage Research, 2006, 90(2): 171−183.

[19] 范围, 吴景贵, 李建明, 等. 秸秆均匀还田对东北地区黑钙土土壤理化性质及玉米产量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 835−846. [Fan Wei, Wu Jinggui, Li Jianming, et al. Effects of straw return on soil physico-chemical properties of chernozem in Northeast China and maize yield therein[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(4): 835−846.]

[20] Borghei A M, Taghinejad J, Minaei S. et al. Effect of subsoiling on soil bulk density, penetration resistance and cotton yield in Northwest of Iran[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2008, 10(1): 120−123.

[21] 许菁, 贺贞民, 冯倩倩, 等. 耕作方式对冬小麦-夏玉米光合特性及周年产量形成的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (1): 101−109. [Xu Jing. He Zhenmin, Feng Qianqian. et al. Effect of tillage method on photosynthetic characteristics and annual yield formation of winter wheat-summer maize cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2017, 23(1): 101−109.]

[22] 王顺科, 李艳红, 李发东, 等. 新疆典型淡水湖和咸水湖芦苇湿地土壤CO_2、CH_4和N_2O排放研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1183−1193. [Wang Shunke, Li Yanhong, Li Fadong, et al. Study on soil CO_2, CH_4 and N_2O discharges from typical freshwater and saltwater lakes in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1183−1193.]

[23] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. 中国农业气象, 2002, 23(4): 48−53. [Xie Junfei, Li Yu'e. Advances in the study of greenhouse gas emission mechanisms and influencing factors in farmland soil[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2002, 23(4): 48−53.]

[24] 曹文超, 宋贺, 王娅静, 等. 农田土壤N_2O排放的关键过程及影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(10): 1781−1798. [Cao Wenchao, Song He, Wang Yajing, et al. Key processes and influences of agricultural soil N_2O emissions[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(10): 1781−1798.]

[25] 朱永官, 王晓辉, 杨小茹, 等. 农田土壤N_2O产生的关键微生物过程及减排措施[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 792−800. [Zhu Yongguan, Wang Xiaohui, Yang Xiaoru. et al. Key microbial processes and emission reduction measures for the production of N_2O in farmland soil[J]. Environmental Science, 2014, 35(2): 792−800.]

[26] Hu H W, Macdonald C A, Trivedi P, et al. Water addition regulatesthe metabolic activity of ammonia oxidizers responding toenvironmental perturbations in dry subhumid ecosystems[J]. Environmental Microbiology, 2015, 17(2): 444−461.

[27] Davidson E A, Swank W T. Environmental parameters regulatinggaseous nitrogen losses from two forested ecosystems vianitrification and denitrification[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1986, 52(6): 1287−1292.

[28] 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 氮肥与生物炭施用对稻麦轮作系统甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1095−1103. [Li Lu, Zhou Ziqiang, Pan Xiaojian, et al. Combined effects of nitrogen fertilization and biochar incorporation on methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in rice-wheat annual rotation system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(5): 1095−1103.]

[29] 殷全玉, 孟祥瑞, 赵世民, 等. 有机无机氮肥配施下洛阳烟田土壤N_2O排放特点及其控制因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 330−337. [Yin Quanyu, Meng Xiangrui, Zhao Shimin, et al. Soil N in Luoyang tobacco field under combined application of organic and inorganic nitrogen fertilize N_2O emission characteristics and control factors[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35 (2): 330−337.]

[30] 梁东丽, 方日尧, 李生秀, 等. 硝、铵态氮肥对旱地土壤氧化亚氮排放的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 67−72. [Liang

ChinaXiv合作期刊

Dongli, Fang Riyao, Li Shengxiu, et al. Effects of nitrogen types on N_2O emissions of dry-land soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(1): 67–72.]

[31] 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 等. 氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N_2O排放的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(12): 5668–5676. [Xu Hongwei, Li Na, Feng Yongzhong, et al. Effects of nitrogen fertilizer and straw returning methods on N_2O emission in wheat-maize rotationsoil[J]. Environmental Science, 2020, 41 (12): 5668–5676.]

[32] Richardson D, Felgate H, Watmough N, et al. Mitigating release of the potent greenhouse gas N_2O from the nitrogen cycle-could enzymic regulation hold the key?[J]. Trends in Biotechnology, 2009, 27 (7): 388–397.

Effects of protective measures on N_2O emission from farmland soil in a semi-arid area of the Loess Plateau

DU Mengyin[1], YUAN Jianyu[1], LI Guang[1], YAN Lijuan[2], LIU Xingyu[1], QI Xiaoping[1], PANG Ye[1]

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. College of Agriculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Nitrous oxide (N_2O) is an important greenhouse gas. It has attracted much attention as a factor in climate change, and farmland soil is the main source of emissions. Among many variables affecting N_2O emission from farmland, tillage is a key factor but exactly how it regulates N_2O emission from dryland farmland soil is unclear. In this study, traditional tillage (T) was used as a control, and three kinds of conservation tillage were used: no tillage (NT), traditional tillage + straw mulch (TS), and no tillage + straw mulch (NTS). The soil N_2O emission flux of a spring wheat field was measured by static box gas chromatography, and factors affecting N_2O emission and spring wheat yield were measured concurrently. Soil N_2O cumulative emissions under different tillage measures in the spring wheat field decreased in the order T > NT > TS > NTS. Emissions under treatment T were significantly higher than those under other treatments (by 15.87%, 28.08%, and 39.58%, respectively, compared with NT, TS, and NTS). In addition, compared with treatment T, conservation tillage helped to increase the surface soil content of NH_4^+-N and the yield of spring wheat, and reduce the accumulation of NO_3^--N. Correlation analysis showed that soil temperature, soil water content, and NH_4^+-N content were associated with soil N_2O emission. Of these, soil water content and NH_4^+-N content showed significant negative correlations with soil N_2O emission, and soil temperature showed a highly significant positive correlation with N_2O emission. Based on economic and environmental benefits and considering N_2O emission and crop yield, we suggest that NTS is the best tillage strategy in semi-arid areas of the Loess Plateau.

Keywords: greenhouse gases; conservation tillage; farming practices; spring wheat; correlation; Loess Plateau

chinaXiv:202203.00087v1